



动力学

系统辨识与建模

刘 君 夏智勋 编著

国防科技大学出版社

动力学系统辨识与建模

刘 君 夏智勋 编著

责任编辑：徐 飞

封面设计：燕 军

ISBN 978-7-81099-391-3



9 787810 993913 >

定价：28.00元

N94

112

2007

动力学系统辨识与建模

刘 君 夏智勋 编著

夏智勋

PDG

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

动力学系统辨识与建模/刘君,夏智勋编著. —长沙:国防科技大学出版社,
2007.1

ISBN 978 - 7 - 81099 - 391 - 3

I . 动… II . ① 刘… ② 夏… III . 建立模型—动力学—系统辨识—应用
IV . N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 141240 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:徐 飞 责任校对:肖 滨

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×960 1/16 印张:16.5 字数:314 千
2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1 - 1500 册

*

ISBN 978 - 7 - 81099 - 391 - 3

定价:28.00 元

前 言

动力学系统辨识与建模是利用系统运行和试验时获取的数据，结合特定的动力学系统基本原理，建立该动力学系统数学模型的技术学科。它是现代系统控制理论的重要分支，目前还在发展之中，在航空宇航科学与技术学科的重要性日益增强。

动力学系统辨识与建模作为国防科技大学航空宇航科学与技术一级学科的硕士研究生专业学位课程，早期的主要参考书是中国空气动力研究与发展中心蔡金狮研究员所著的《动力学系统辨识与建模》和《飞行器系统辨识》。本书作者 2001 年开始讲授这门课程，发现蔡先生的著作是针对在航空航天领域从事飞行器系统辨识、系统仿真和系统动态分析的科研人员和工程技术人员编写的，属于起点较高的学术专著，书中基本理论部分讲述较为简略，介绍的应用问题涉及知识面深广，对于还处于理论学习阶段的硕士研究生来说理解有困难；另外，作为研究生教材来使用，书中没有例题，不便于课后自习。

作者在授课时，根据自动控制类和电子信息类专业的本科高年级学生和硕士研究生教学的相关内容编写讲义，但在使用中发现由于专业背景和理论基础存在一定差异，直接按照参考文献中专业术语和名词进行表述比较困难。随着研究生招生规模扩大，同班级的同学不仅在年龄、专业、科研经历等方面存在差异，在知识结构及应用知识的熟练程度等方面也有明显不同。为此，根据国防科技大学硕士研究生“动力学系统辨识与建模”课程教学大纲，编写了讲义，经过十多次讲授，不断完善，形成现在的内容。

本教材主要面向航空宇航科学与技术学科的硕士研究生，目的是使学生在课程学业后期，能够阅读和理解类似于蔡先生等人的学术著作，因此在编写内容上着重基本理论介绍，涉及实际应用问题的部分相对较粗浅。

全书共分十五章。

第一章：引言部分，介绍系统辨识和系统建模概念、研究内容、重要应用领域。

第二章：这部分内容主要建立本课程和以前学习的线性系统理论基本概念和数理统计基本知识的联系，适应不同知识结构和学习经历的学生。

第三章和第四章：介绍系统辨识中的参数估计，包括最小二乘、贝叶斯估计、最小方差、最大似然等参数估计准则，推导迭代算法和递推算法两类参数估计算法。考虑到基于最小二乘准则的算法常常对其他参数估计准则的计算也有效，因此对最小二乘参数估计算法做了较为详尽的介绍。目前应用广泛的最大似然参数估计涉及到卡尔曼滤波，本章从贝叶斯估计出发导出最大似然参数估计准则，具体算法放在第八章介绍。

第五章和第六章：介绍系统辨识中的状态估计，从最小二乘滤波和最小方差估计开始，逐步引入线性离散系统的卡尔曼滤波理论基础和算法，推导出线性连续系统的卡尔曼滤波表达式；最后讲述卡尔曼滤波用于实际非线性系统状态估计时派生出的若干算法。

第七章：介绍近些年发展较快的分割算法。

第八章：基于卡尔曼滤波的最大似然参数估计。

第九章：介绍模型结构辨识的基本理论，包括最大信息量准则、最大可信度准则、统计检验和最小预测误差平方和准则，以及对应的优选算法。

第十章：介绍辨识准度评价与系统模型验证的基本理论。

第十一章：介绍动力学系统辨识与建模中关于试验设计中具有共性的理论。

第十二章到第十四章：简单介绍以上动力学系统辨识与建模知识在航空宇航科学领域的应用。对于涉及的动力学系统理论较为简略，重点放在如何应用知识解决问题，包括复杂非线性系统的简化处理等。

第十五章：航空宇航领域很多动力学属于分布参数系统，以简单模型的气动热辨识问题为研究对象，对于分布参数系统的动力学辨识建模进行简单介绍。

本教材早期仅仅有前8章内容。2003年8月得到中国空气动力研究与发展中心汪清研究员提供的国防科研试验工程技术系列教材《飞行器系统辨识学》，后面第九章至第十一章内容基本上直接采用该书的相关章节。系统辨识与建模是一门技术科学，学习中要求通过实践性环节提高研究生应用知识的能力；教学实施中，根据研究生所在二年级学科，结合航天研究领域常见动力学系统辨识问题，进行人员分组，发挥团队精神，协作准备，在课堂上作公开报告，组织全体学员讨论。第十二~十五章内容主要来源于学生完成的教学实践报告。

在编写过程中还参考国防科技大学航天与材料工程学院2001级到2003级部分硕士研究生的听课笔记，文稿校对、打印和整理过程中得到李九天的热情帮助。在此表示感谢！

文中纰缪之处在所难免，诚望读者提出宝贵意见。

作者

2007年1月于长沙

目 录

第一章 绪 论

1.1 系统建模	(1)
1.2 系统辨识	(4)
1.3 系统辨识主要研究内容	(7)
1.4 系统辨识的主要作用	(11)
1.5 动力学系统辨识与建模	(13)
习 题	(16)

第二章 线性系统与数理统计基本理论

2.1 线性系统理论基础	(17)
2.2 数理统计基本概念	(27)
2.3 随机线性系统	(38)
习 题	(45)

第三章 参数估计(1)

3.1 最小二乘估计准则	(48)
3.2 最小二乘估计的部分迭代算法介绍	(54)
3.3 最小二乘估计的递推算法	(62)
习 题	(67)

第四章 参数估计(2)

4.1 贝叶斯估计	(69)
4.2 基于贝叶斯思想的最小二乘估计	(77)
4.3 极大似然估计法基本原理	(84)
习 题	(90)

第五章 状态估计(1)

5.1 最小二乘滤波	(94)
5.2 最小方差估计	(97)
5.3 线性离散系统的卡尔曼滤波	(100)
5.4 线性连续系统的卡尔曼滤波	(111)
习 题	(116)

第六章 状态估计(2)

6.1 广义卡尔曼滤波	(118)
6.2 增广的广义卡尔曼滤波	(120)
6.3 修正增益广义卡尔曼滤波	(123)
6.4 平方根分解滤波	(125)
习 题	(130)

第七章 分割算法

7.1 离散系统的分割算法	(132)
7.2 连续非线性系统的分割算法	(134)
7.3 连续非线性系统的广义分割算法	(136)
7.4 离散系统的广义分割算法	(139)
7.5 广义多分割算法	(140)
7.6 广义分割辨识算法	(143)
习 题	(146)

第八章 基于卡尔曼滤波的最大似然参数估计

8.1 非线性动力学系统最大似然算法	(147)
8.2 线性动力学系统最大似然算法	(152)
8.3 修正最大似然准则	(155)
8.4 输出误差法	(156)
8.5 方程误差法	(157)
8.6 最大似然近似算法	(158)
8.7 最大似然递推算法	(160)
习 题	(163)

第九章 模型结构辨识

9.1 模型结构辨识准则	(165)
9.2 模型结构辨识算法简介	(172)
9.3 新的模型结构建模方法简介	(175)
习 题	(177)

第十章 辨识准度与系统验证

10.1 辨识参数准度评价准则	(178)
10.2 辨识参数准度的简化算法	(182)
10.2 辨识参数准度的置信区间估计	(185)
10.4 辨识参数准度的工程判断	(188)
习 题	(189)

第十一章 试验设计和数据辨识前处理

11.1 最优输入设计准则	(190)
11.2 输出设计	(194)
11.3 试验数据预处理	(195)
11.4 数据相容性检验和数据重建	(195)
习 题	(199)

第十二章 应用实例(1)——气动力参数辨识

12.1 飞行器动力学系统状态空间表达式	(200)
12.2 空气动力学数学模型集	(205)
12.3 固定翼飞行器气动力参数辨识	(207)
12.4 再入体气动力矩导数辨识	(215)
12.5 其他气动力模型辨识建模简介	(221)

第十三章 应用实例(2)——惯性仪表误差系数辨识

13.1 惯性仪表数学模型	(224)
13.2 误差模型表达式	(226)
13.3 观测方程	(228)
13.4 误差系数辨识流程简介	(230)

第十四章 应用实例(3)——卡尔曼滤波应用

14.1 卡尔曼滤波在航天器姿态确定中的应用	(231)
14.2 卡尔曼滤波在防空导弹导引头控制系统设计中的应用	(232)

第十五章 分布参数系统辨识建模基本原理

15.1 分布参数系统辨识基本理论	(239)
15.2 航天飞行器气动热辨识建模简介	(245)

参考文献	(251)
------------	-------

第一章 绪 论

§ 1.1 系统建模

系统是由内部相互联系、相互制约、相互作用的要素构成,具有整体功能和综合行为的统一体,整体性是系统最基本的特性,同时系统接受外部因素的制约和作用。根据所研究的问题和对象不同,系统可以大到宇宙、地球、世界经济体系,小到—个传感器,一个细胞^[1]。

在自然辩证法中,系统与要素组成一对范畴;要素是构成系统的组元,是系统存在的基础,要素之间既相互独立,又相互联系。人们通过分析系统要素的功能和作用,认识系统的整体特性。

系统的整体性所体现出来的功能和特性原则上不等于组成这一系统各要素的功能和特性的总和;同一要素在不同系统或同一系统不同发展阶段中的地位和作用有差异,有时处于主导、支配地位,有时处于从属、被支配地位。系统和要素也不是一成不变的,当某一个系统和周围环境在相互作用下组成较高级的系统时,它就转化为要素;同样系统的任意一个要素,在一定条件下也可以看作较低一级的系统。例如,飞行器作为一个较大的系统包括制导和控制系统、推进系统、结构、有效载荷等要素,这些要素实际上也可以构成相对独立的研究系统。

人们对客观事物的研究总是由表及里,从定性到定量,最终希望能确定所研究系统内部因素之间、系统与外部因素之间比较准确的关系,以便更深刻地了解系统的内在规律和特性。在现代科学的许多领域,所谓系统规律和特性就是某种数学模型;因为在数学上,系统的基本特性可以用状态参数加以描述,状态参数一旦确定,系统也就确定了。系统建模就是建立表征系统状态参数之间以及与外作用之间的相互作用的数学表达式的过程。

系统建模是系统分析和研究的基础。能够反映系统本质特性的模型建立后,

可以借助数学分析、数值模拟、计算仿真等手段开展系统分析,从而实现对系统的合理设计和有效控制。

系统建模主要有两类方法:理论建模和实验建模。

§ 1.1.1 理论建模

理论建模是从已知的原理、定理和定律出发,通过对系统内在规律的机理分析研究,建立系统的数学模型。由于飞行器动力学系统已有近百年的研究历史,基本问题都有较为成熟的理论模型,如建立在质量、动量和能量守恒定律基础上的刚体动力学模型、弹性体动力学模型、流体力学模型等;目前理论建模的主要工作是根据所研究系统的特殊性,对上述模型方程进行简化或确定其中的部分参数。例如,建立在牛顿力学基础上的空气动力学 Navier-Stokes 基本方程较为准确地反映了飞行器在大气层内的物理本质,但是由于方程是非线性的,难以直接求解,在实际应用工程中,通过对流动机理的分析,引入一定的假设条件,从数学形式上简化、推导出用于机翼的升力线等工程估算模型。目前应用广泛的计算流体力学(CFD)采用的各种算法本质上也是对基本方程的离散近似,也属于理论建模的范围。

由于这类问题的系统模型通常是通过分析过程的运动规律,运用较为严格的数学演绎推导或计算机仿真求解建立的,在控制论中称之为“白箱”问题。

例 1.1:如图 1.1 所示,流入速度为 u ,流出速度为 y ,水位为 h ,水箱面积为 s ,管道进出口为单位面积,试建立水位与流出量的模型^[2]。

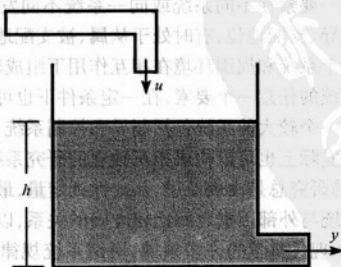


图 1.1 水箱系统

解:质量守恒:

建立质量守恒方程为 $s \cdot \dot{h}(t) = u(t) - y(t)$

取出口位置作为参考点,假设 $s \gg 1$, $h(t) \ll y(t)$, 沿流线的伯努利方程:

$$\frac{P_1}{\gamma} + h = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{y^2}{2g}$$

这里 γ 是比重。

由于液面和出口的大气压相同即 $P_1 = P_2$, 则近似有:

$$y(t) = \sqrt{2gh(t)}$$

这是通过理论建模得到的水箱系统模型。

§ 1.1.2 实验建模

在理论建模时需要对实际过程的机理有较深入的理解,对所研究的对象必须进行合理简化假定,否则会使问题过于复杂,难以建模。从以上建模过程可以看出,建模时未考虑水箱液面晃动、管壁摩擦、开关损失等,如果应用中对系统特性要求非常精确,这一模型显然不合适。对于这种较为简单的动力学系统可以采用理论建模,对于飞机、导弹航天器等比较复杂的飞行器综合性大系统来说,状态参数之间的相互作用非常强,涉及的因素非常多,常常难以归纳出符合实际情况的简化假定;许多情况下部分因素还具有随机特征,难以用确定性的理论模型进行描述,只能采用在理论指导下的实验建模。

实验建模是直接从事系统运行或试验中测量到数据,应用系统辨识方法建立系统模型。实验建模原则上适用于任何可以观测的系统,包括连基本规律都不十分清楚的“黑箱”问题。现在许多学科的经验公式或系数,就是通过对实验数据采用拟合等数学方法处理得到的,例如太阳黑子的活动情况与大气环流运动周期和流行病爆发之间相互影响等研究,都是实验建模。

在宇航科学与工程有许多研究领域,经常遇到的问题是已知系统满足某些基本的规律,但是有些机理还不是特别清楚,属于控制论定义的“灰箱”问题。例如,流体运动满足建立于质量守恒、动量守恒和能量守恒定律基础上的 Navier-Stokes 方程,但是对于雷诺数较大时湍流现象、大攻角飞行时的非定常分离等非线性流动现象等,目前还没有很好的数学描述,需要通过自由飞行实验进行建模。再如,飞行器的飞行弹道和运动稳定性基本满足基于经典力学的六自由度弹道方程,理论上可以计算出弹头飞行轨迹和落点,但是实际弹着点往往与理论落点有差异,这是由于在飞行过程中发动机推力和气动力等都是随机变量,同时弹头与飞行大气环境之间相互作用也还不是十分清楚,直接用地面发动机试车和风洞实验数据建立的数学模型不够准确。

对这类“灰箱”问题只能将以上理论建模和实验建模两种方法结合起来,对机理已知部分采用理论建模,给出解析表达式,对机理还不清楚部分采用辨识建模。这类问题也是本书论述的动力学系统研究中主要关注的问题。

对于上例,如果需要更为准确的模型,考虑管道摩擦、液面波动等真实流动效应引起的误差,工程上近似为:

$$y(t) = k \sqrt{h(t)}$$

这里 k 是与具体系统有关的参数,通过试验或经验确定。

一般情况下,系统模型越精确、适应条件越广,则模型就越复杂。对于较为复杂的系统,由于认识水平有限,建立一个全面描述系统特性的统一模型十分困难;有时描述系统特性的细致精确模型难以应用,工程上经常根据研究侧重点不同建立不同的模型,因此一个系统也可能有不同的模型。由于实际系统在不同的条件下具有不同的特性,因而系统模型仅仅在一定条件下成立。

因此,在工程应用中选择模型之前,需要了解建模过程。

§ 1.2 系统辨识

系统辨识的作用是研究如何建立系统数学模型,随着计算机的广泛应用和迅速发展,系统辨识学构成现代控制理论中一个重要分支。控制理论中对系统辨识有多种定义^[1,3,4]。为便于理解,下面简单介绍控制论发展过程中对这一概念的认识。

1962年 L. A. Zadel 认为“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型”。这个定义明确了系统辨识的三大要素:从可观测系统得到信息组成的数据、模型类和等价准则。其中数据是辨识的基础,准则是辨识的依据,模型类是辨识的范围。在实践中发现,按照这一定义寻找一个与实际过程完全等价的模型非常困难,为此又有一些比较实用的定义。

1974年 P. Eykhoff 给辨识下的定义是“辨识问题可以归结为用一个模型来表示客观系统本质特征的演算,并用这个模型把对客观系统的理解表示为有用的形式”,后来他做了进一步解释“这个辨识定义强调了一个非常重要的概念,最终模型只应表示动态系统的本质,并且把它表示成适当的形式。这也就意味着不是期望获得一个实际的确切的数学描述,只是需要一个实用的应用模型。”

1978年 L. Ljung 给辨识下的定义更加实用:“辨识有三个要素:数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型类中寻找一个与数据拟合得最好的模

型。”由于观测到的数据一般包含系统运行过程噪声和仪器测量噪声,因此通过辨识进行建模不过是实际过程特性的一种近似描述。这一定义较好地反映了辨识方法的数理统计本质,被从事这一领域研究和应用的科研工作者广泛采用。

1994年蔡金狮主编的《飞行器系统辨识》认为“系统辨识是一门通过观测系统试验过程中输入—输出关系来建立系统数学模型的技术学科,也是一门基于现代控制理论发展起来已开拓到自然科学、社会科学和应用技术科学众多领域的交叉学科。”这一定义明确系统辨识是一门技术学科,同时反映了它的发展趋势。

(1) 模型集

早期的模型集通常取为最简单的线性代数形式,之后推广为多项式形式;电子技术快速发展提供了处理复杂数值计算的能力,现在开始采用样条函数、指数函数、超越函数,甚至有限元、有限体积元、神经网络元作为候选数学模型集。对于“灰箱”问题,由于系统应满足的某些定律已知,建立有系统必须满足的状态方程组,状态方程组就是候选数学模型集应满足的约束条件。

(2) 辨识准则

最早的辨识准则是高斯提出的已得到广泛应用的最小二乘准则;随着现代控制理论和统计理论的发展,又提出了最小方差准则、最大似然准则、贝叶斯准则、 H_∞ 准则等辨识准则;辨识理论还证明了各种辨识准则能使辨识所得数学模型渐近趋于真实系统的条件。

(3) 辨识算法

对于给定的候选数学模型集,根据辨识准则建立辨识方程组之后,系统辨识问题就化成了一个极值优化计算问题。对于线性系统,应用最小二乘准则,常可得到解析解;对于非线性系统,采用较为复杂的辨识准则,则辨识方程组成为非线性方程组,问题成了含有微分、积分方程的泛函极值问题,无解析解。通常采用迭代算法求解;也可采用逐点递推逼近算法求解。

下面介绍几个与系统辨识定义相关的术语。

根据数据处理与现场实际过程的关系,系统辨识分为离线辨识和在线辨识两种。离线辨识也称事后处理,先将实验过程中输入—输出数据记录下来,实验结束后再进行辨识;由于时间较充裕,记录的信息一般较多,可以适用较复杂的建模问题。在线辨识,即在系统运行中边测量边辨识,一般将辨识结果直接用于系统控制,要求处理信息速度较快,通常采用递推算法,不断用新的测量数据修正当时的估计值,由于计算机处理过程比较耗时,目前还主要用于简单模型的建模。但是随着微机电系统(MEMS)、人工智能、自适应控制等现代控制技术发展,在线辨识的研究和应用将越来越多。

两种方式的控制原理如图 1.2 和图 1.3 所示。

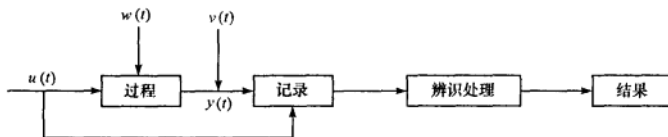


图 1.2 离线辨识

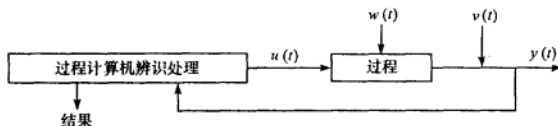


图 1.3 在线辨识

系统状态的控制特性分为开环控制和闭环控制两种,如图 1.4 和图 1.5 所示,针对这两种状态的辨识也分别称为开环系统辨识和闭环系统辨识。开环系统的输入与输出信号之间不相关,系统的输出仅仅反映系统输入和系统本身的特性,系统辨识可以对输入和输出信号分别测量和处理,数据处理比较简单明确;闭环状态输出信号不仅反映系统特性,还包括反馈装置的特性,辨识时要从输出的可观测量中将系统特性和反馈装置特性区别出来,这样一来问题就复杂化了。尽管闭环系统辨识比开环系统辨识复杂,但是有时某些工程应用中要求辨识试验必须在闭环条件下进行,比如,静不稳定飞机做飞行试验时,如果断开飞控系统,则可能造成灾难性的后果;再如,在经济、生物等领域中,许多系统往往还存在固有的、无法断开的或隐蔽的反馈;还有利用在线辨识进行控制的系统也需要闭环系统辨识,以免系统工况偏离正常值太远而发生危险或影响产品质量;因此,对系统在闭环状态下的辨识进行研究成为近年系统辨识方法研究的重要发展方向,在今后工程中的应用也将愈来愈多。

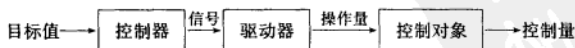


图 1.4 开环系统(前馈控制)

最后介绍一下系统辨识与系统分析、系统控制之间的区别。

系统辨识与系统分析是两种互逆的研究手段,系统分析是已知系统的数学模